

「光伏发电」

# 基于PSCAD/EMTDC的单相光伏发电系统并网仿真研究

文/西安工程大学电子信息学院 李 艳 邵文权 程 远  
国网陕西省电力公司电力科学研究院 张志华

针对目前单相光伏发电的趋势及其并网受环境影响的因素,介绍了单相光伏发电的系统结构,讨论了基于电导增量法的MPPT控制算法及逆变并网的电压电流双闭环控制策略。根据理论分析在PSCAD中搭建了单相光伏并网的仿真模型。仿真结果表明,在恒定温度恒定光照强度和变光照强度下,MPPT算法可快速跟踪控制,使光伏发电系统迅速做出反应并工作在最大功率点处,逆变得到的电流与电网电压同频同相,且并网谐波含量符合380 V的并网标准。所建模仿真具有一定的准确性和有效性,可为单相光伏的并网运行提供一定的理论设计经验和实践基础。

太阳能是无污染、可再生、可存储、分布发电的理想替代能源,光伏发电已成为世界能源发电的热门话题。目前,光伏发电的一种新型形式家庭屋顶光伏发电行业逐渐兴起,它以就近发电、就近并网、就近转换、就近使用的原则,有效地提高了发电量并解决了电能传输过程中损耗严重的问题。与传统的发电方式相比,家庭光伏发电多以单相并网,并且易受光照、温度等外界环境的影响,导致发电不稳定,由于光伏板材料、特殊的制造过程,一旦光伏板成形就不得轻易改变其工作参数。因此,在光伏发电系统的设计过程中,对整个发电系统的计算机仿真是极其重要的一步,这也是为实际设计提供理论依据的有效技术手段。有的文献在Matlab中建立了带有MPPT功能的光伏阵列通用仿真模型;有的文献提出了光伏并网逆变器自适应电流滞环跟踪控制,并在Matlab建立了仿真模型。有的文献应用PSCAD仿真软件建立了光伏阵列与MPPT控制器

模型,但其并未就并网光伏发电系统进行仿真。有的文献在PSCAD中建立了三相光伏并网发电系统,但其逆变后的并网电流畸变较大。

本文在PSCAD软件环境下,利用其原有元件及自定义语言算法,搭建了一个单相光伏发电并网系统,在恒定光强和变光强情况下,验证了光伏发电的特性曲线,分析了光强变化对系统输出电压电流以及功率的影响。为提高光伏发电效率,采用两级式控制策略实现光伏并网,并网电流信号与电网电压同频同相。根据相关标准,公用电网380 V系统并网电流总谐波畸变率要低于5%,各次谐波畸变率应小于3%;系统标准规定电压总谐波畸变率为5.0%,各次谐波电压畸变率不超过4.0%。本文并网电压电流信号的谐波畸变率均在标准范围内,并且波形完美。

## 光伏阵列的数学模型

光伏电池的等效电路如图1所示。

电池在光照下所产生的光电流 $I_g$ 与光照强度成线性关系。通过并联二极管的电流 $I_d$ 是产生PV电

国家电网公司科技项目(SGTY HT/15-JS-193)。

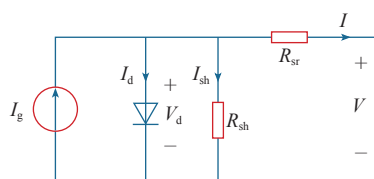


图1 光伏电池等效电路

池非线性  $I-V$  特性的主要来源。应用基尔霍夫定律，可得到光伏电池输出电流为

$$I = I_g - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

其中

$$I_g = I_{SCR} \frac{G}{G_R} [1 + \alpha_T (T_c - T_{cR})] \quad (2)$$

$$I_{sh} = (U + IR_{sr}) / R_{sh} \quad (3)$$

$$I_d = I_o \left[ \exp \left( \frac{U + IR_{sr}}{nkT_c / q} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$I_o = I_{oR} \left( \frac{T_c^3}{T_{cR}^3} \right) \exp \left[ \left( \frac{1}{T_{cR}} - \frac{1}{T_c} \right) \frac{q e_g}{nk} \right] \quad (5)$$

式(1)~式(5)中,  $I_{SCR}$  为参考照度  $G_R$  和参考电池温度  $T_{cR}$  时的短路电流;  $\alpha_T$  为光电流的温度系数(硅光伏电池为  $0.0017 \text{ A/K}$ );  $G$  和  $T_c$  分别为实际照度和实际电池温度;  $U$  为光伏电池端口电压;  $R_{sr}$ 、 $R_{sh}$  为光伏电池的串联和并联电阻;  $n$  为发射系数, 与PN结的尺寸、材料和通过的电流有关, 值在  $1 \sim 2$  之间, 硅电池取  $1.3$ ;  $k$  为玻尔兹曼常数, 一般值为  $1.38 \times 10^{-23}$ ;  $q$  为电子电荷常数, 值为  $1.60 \times 10^{-19}$ ;  $I_o$  为二极管饱和电流;  $I_{oR}$  为参考温度下的饱和电流;  $e_g$  为光伏电池材料的带隙能量。

为使系统能输出较大功率的电, 采用由多个光伏电池经串并联组成的光伏阵列作为光伏电源。

## 最大功率跟踪控制

工作在随机波动的光照强度和温度下, 光伏输出电压也会随机波动, 要想使光伏阵列输出的信号最优, 就要对其进行最大功率点跟踪控制, 使其时刻输出最大功率点处的电压。目前, 电导增量法是常用的MPPT控制方法, 在光照强度和温度发生变化时, 光伏阵列输出能平稳跟踪其变化, 寻找最大功率输出点, 过程中功率损失较小。电导增量法的控制流程如图2所示。

图2中,  $I_{pv1}$  和  $U_{pv1}$  分别为当前采样时刻的光伏电池输出电流和电压,  $I_{pv0}$  和  $U_{pv0}$  分别为前一个采样时刻的光伏输出电流和电压,  $U_{ref}$  为参考电压,

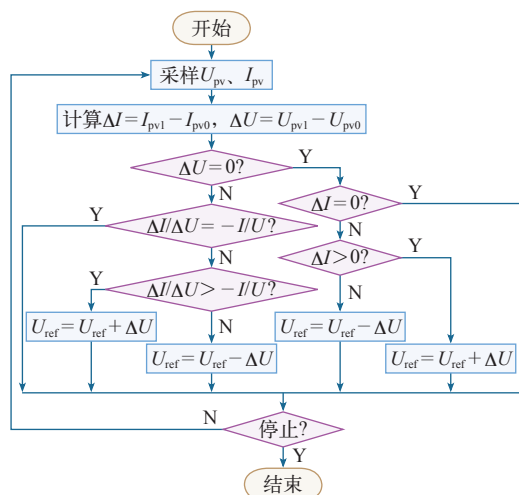


图2 电导增量法的控制流程图

$\Delta U$  为电压增量步长。

## 单相光伏并网系统

### 1. 并网系统结构

图3为单相光伏发电系统结构, 主要包括光伏阵列、DC/DC、DC/AC两级式控制电路、滤波电路; DC/DC电路利用MPPT算法实现对光伏阵列进行最大功率跟踪控制, 保证光伏阵列可以输出最大功率点处的电压和电流; DC/AC环节采用电压型单相全桥逆变电路, 将直流量逆变为符合并网要求的工频交流量, 最后通过滤波电路并入电网。

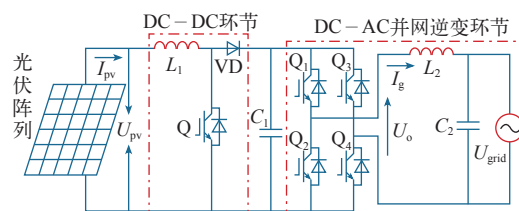


图3 单相光伏逆变并网系统结构图

$L_1$ 、 $VD$  为DC-DC电路的电感和二极管,  $C_1$  为直流母线电容, 起到消除纹波和存储能量的作用, 直流母线电容的电压即为直流母线电压;  $L_2$  和  $C_2$  为滤波电路的电感和电容,  $U_{grid}$  为网侧电源。

### 2. 光伏并网系统的控制策略

单相光伏并网系统的控制策略采用两级式控制, 此控制策略前后级之间没有耦合, 控制更加简单方便。整体控制框图如图4所示。

前级DC/DC控制光伏阵列输出的  $I_{pv}$  和  $U_{pv}$  信号

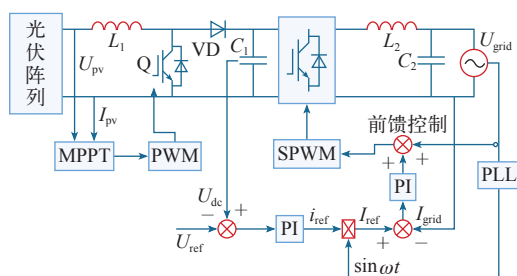


图4 双闭环控制框图

送入到MPPT算法中进行计算，跟踪得到光伏阵列最大功率点的电压 $U_{mppt}$ ，光伏阵列输出电压 $U_{pv}$ 与 $U_{mppt}$ 进行比较得到误差值，经过PI调节器后再与三角载波信号进行比较，进而得到控制升压电路晶闸管工作的驱动信号，前级电路控制框图如图5所示。

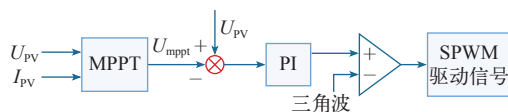


图5 前级DC-DC控制电路框图

后级控制采用电流电压双闭环控制策略。电流内环控制逆变输出的电流与电网电压同频同相，电压外环维持直流母线电压稳定。

根据图3，利用基尔霍夫定律，可得到逆变器输出到并网电路的电压平衡方程

$$U_o = L \frac{dI_g}{dt} + RI_g + U_{grid} \quad (6)$$

式中， $R$ 为电感 $L_2$ 的内阻。对式（6）进行拉氏变换后可得

$$I_s(s) = \frac{1}{Ls + R} [U_o(s) - U_{grid}(s)] \quad (7)$$

式中， $1/(Ls + R)$ 为滤波系统的传递函数。本文中逆变器开关频率设计为8 kHz， $8 \text{ kHz} \gg 50 \text{ Hz}$ ，忽略开关管的延时及死区时间等影响因素，可将单相逆变桥等效为一个惯性环节，传递函数为

$$G_{inv}(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (8)$$

式中， $T$ 为时间常数； $K$ 为逆变器的增益。其采用的PI调节器的传递函数为

$$G_{pi}(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (9)$$

式中， $K_p$ 和 $K_i$ 分别是PI调节器的比例系数和积分系数。结合系统结构图和各部分的传递函数可得到并网电流内环控制的系统框图，如图6所示。

由图6可得电流内环的开环传递函数

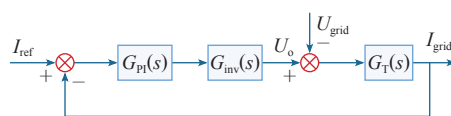


图6 并网电流内环控制框图

$$G(s) = G_{pi}(s) \cdot G_{inv}(s) \cdot G_T(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \cdot \frac{K}{Ts + 1} \cdot \frac{1}{Ls + R} \quad (10)$$

为使PI环节抵消并网逆变器系统中较大的时间常数，令 $K_p/K_i = L/R$ ，开环传递函数可简化为

$$G(s) = \frac{K \cdot K_p / R}{s(Ts + 1)} \quad (11)$$

化简后为典型的I型系统，按照“二阶最佳”法设计，令 $KT = 0.5$ ，代入式（6）计算可得PI调节器参数 $K_p$ 和 $K_i$ 的值

$$K_p = \frac{0.5L}{KT} \quad K_i = \frac{0.5R}{KT} \quad (12)$$

公式（10）~式（12）是电流内环PI参数的计算方法。

为了抑制电网系统其他部分的波动影响到并网电流，在电流控制系统中引入电网电压前馈补偿环节来消除扰动信号，控制框图如图7所示。

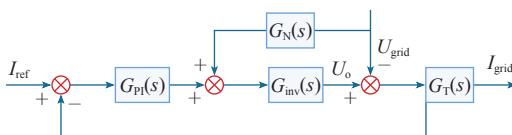


图7 加电网电压前馈补偿控制结构框图

加入电压前馈控制的开环传递函数

$$[I_{ref} - I_{grid}] = -\frac{G_T(s)[1 + G_N(s)G_{inv}(s)]}{1 - G_{pi}(s)G_{inv}(s)G_T(s)} U_{grid}(s) \quad (13)$$

令式（13）中电压前馈补偿量 $G_N(s) = -1/G_{inv}(s)$ ，则 $[I_{ref} - I_{grid}] = 0$ ，此时系统误差为0，从而达到消除因电压突变对电流造成的影响的目的。

系统整体控制可描述为：系统检测的直流电压实际值与给定电压 $U_{ref}$ 进行比较，偏差经过PI调节器后得到 $i_{ref}$ ，采用锁相环（PLL）锁取电网相位和频率，调整参考电流，与实际检测到的 $I_{grid}$ 相比较，差值经过PI环节后与三角波比较得到SPWM驱动信号，控制逆变电路工作。

## 仿真结果与分析

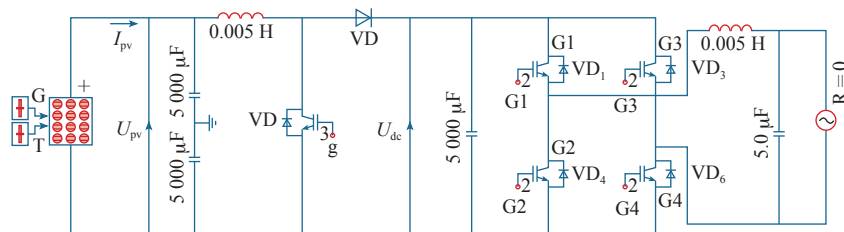
### 1. PSCAD系统建模

基于上述原理介绍和控制策略分析，在

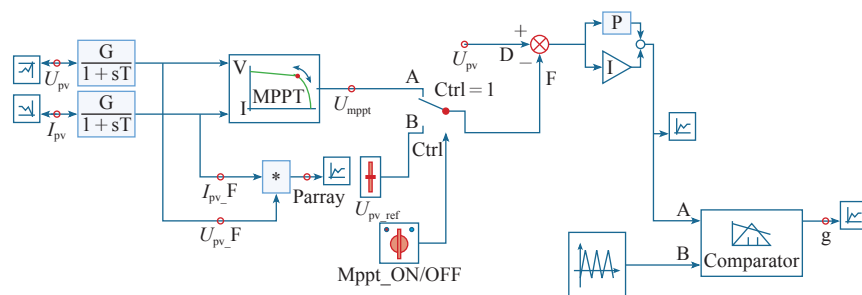
PSCAD\EMTDC环境下搭建系统仿真模型, 模型的主要参数有: 光伏阵列中每个光伏模块串中串联30块光伏模块, 并联光伏模块串8串, 每个光伏模块中光伏电池串中串联光伏电池60个, 并联光伏电池20个。光伏阵列的开路电压 $U_{oc}=1\,446\text{ V}$ , 短路电流 $I_{sc}=240\text{ A}$ 。Boost升压电路和逆变电路的

开关频率均为8 kHz, Boost电感 $L_1=0.005\text{ H}$ , 直流母线电容 $C=5\,000\text{ }\mu\text{F}$ , 逆变桥输出滤波电感 $L_2=0.000\,5\text{ H}$ , 滤波电容 $C_2=1.28\text{ }\mu\text{F}$ 。阵列输出经升压逆变后与380 V、50 Hz交流电网并网, 系统建模如图8所示。

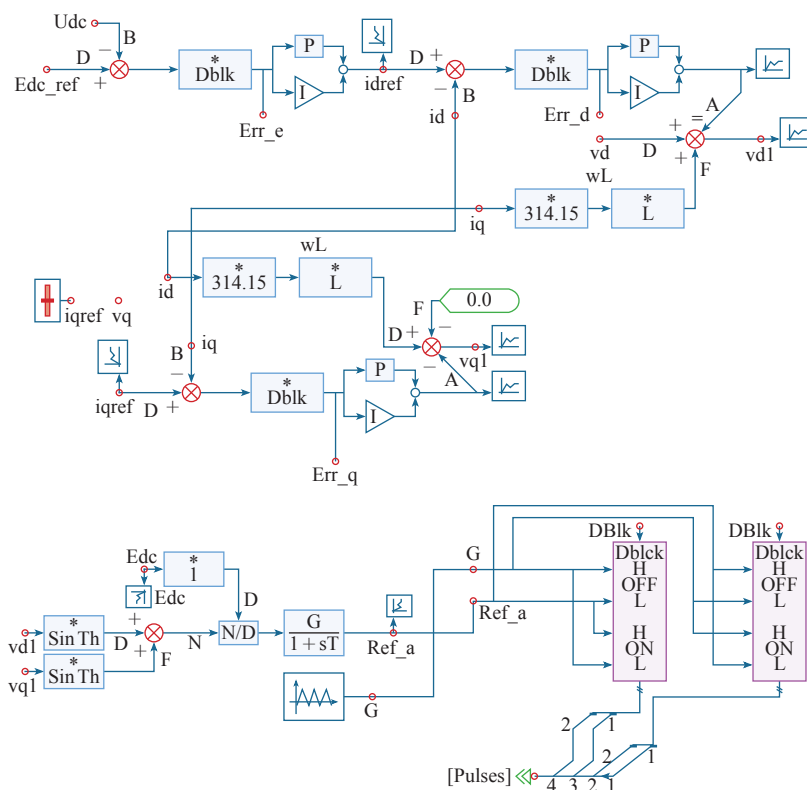
图8为在PSCAD中搭建的单相光伏并网系



(a) 光伏逆变并网主电路图



(b) 前级Boost控制模型



(c) 后级双闭环控制电路模型

图8 单相光伏并网系统模型

统。其中,图8a为光伏发电的主电路模型,图8b为前级DC-DC控制电路模型,图8c为后级DC-AC控制电路及驱动信号发生模型。

## 2. 仿真结果与分析

### (1) 恒定光强和温度

在恒定光照强度和环境温度情况下( $G = 1\,000\text{ W/m}^2$ 、 $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ )光伏阵列的 $I-U$ 、 $P-U$ 曲线及光伏阵列输出的电压电流、有功功率、逆变并网功率如图9a~f所示。

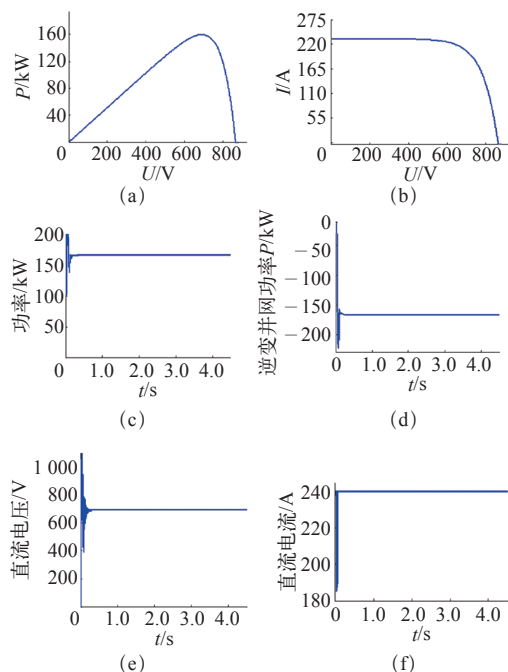


图9 恒定光强和温度下输出电信号

由图9可知,在外界条件稳定的情况下,经过0.2 s的小幅振荡,光伏阵列输出功率稳定在最大功率点165 kW,电压跟随功率快速响应,在同一时间稳定在690 V,此时电流值为240 A。0.2 s后光伏阵列各个电信号都稳定在最大功率点时的值,表明MPPT算法可以很好的跟踪控制。图9d表示光伏发电系统向电网输送功率。

### (2) 改变光照强度

保持温度 $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 度,改变光照强度 $G_1 = 400\text{ W/m}^2$ 、 $G_2 = 600\text{ W/m}^2$ 、 $G_3 = 1\,000\text{ W/m}^2$ 进行仿真,得到光伏阵列波形以及并网波形如图10a~f所示。

图10给出了随光照强度变化的 $I-U$ 、 $P-U$ 曲线,电流 $I$ 和功率 $P$ 都随着光照强度的增强而增加,光照强度在1.5 s时刻从 $G_1 = 400\text{ W/m}^2$ 增大到 $G_3 = 1\,000\text{ W/m}^2$ ,经过1.5 s后在3.0 s光照强度下降

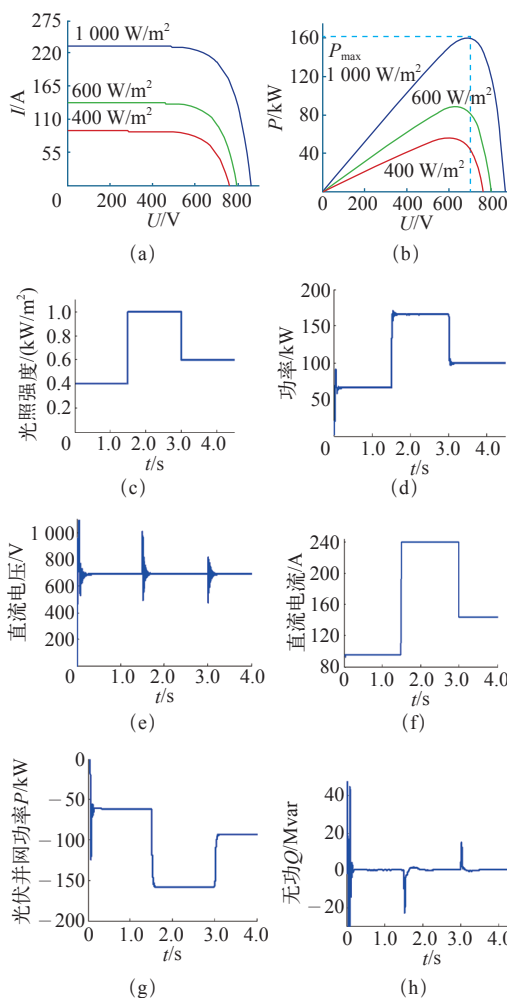


图10 光照强度变化时光伏并网系统响应

到 $G_2 = 600\text{ W/m}^2$ 变化过程中,光伏阵列的输出功率 $P$ 和直流电流 $I$ 随着光照强度的变化迅速做出反应,输出直流电压 $U$ 维持在相应的最大功率点电压690 V处,并在光强改变时刻存在小幅振荡。图10g、h分别是光伏并网向电网输送的有功和无功功率,输送的有功功率等于光伏阵列输出的有功功率。从图10d中可以看出 $400\text{ W/m}^2$ 光强下的最大功率约为66 kW、 $1\,000\text{ W/m}^2$ 光强下为165 kW、 $600\text{ W/m}^2$ 光强下为99 kW。图10证明,光伏阵列的输出可快速跟踪相应光强下的最大功率,验证了本文MPPT算法控制的灵敏性和准确性。

光伏发电系统经过后级的单相电压型逆变电路并入380 V电压等级的电网线路,通过锁相环PLL锁取系统50 Hz的频率信号,对DC-AC环节的控制电路进行锁相控制,以达到并网电流与电网电压同频同相的目的,锁取的系统频率以及并网电流与电网电压信号如图11所示。

图11a为锁相环的锁相频率,图11b为锁相相

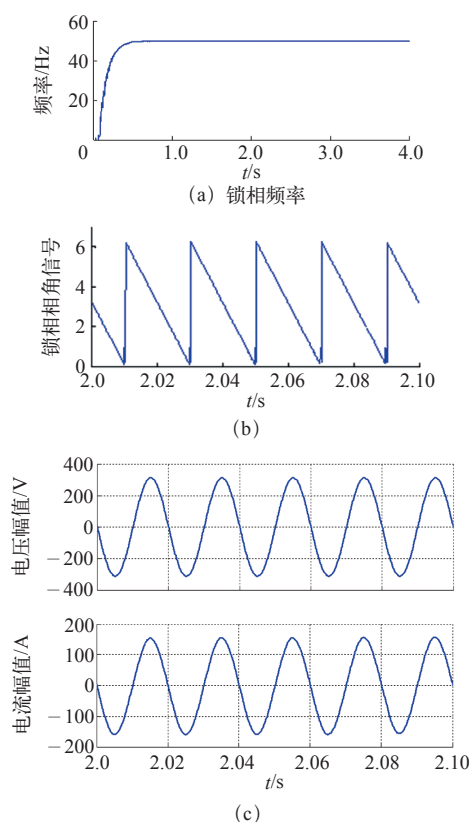


图11 并网电压电流信号

角信号，其实现对输入电网电压信号频率的自动跟踪，使输出信号与输入信号同步频率，图11a经过0.2 s可精确的锁取系统工频50 Hz的频率信号，此信号作为逆变控制电路的参考，使输出相同频率的电流信号，图11c为并网电流与电压信号，可看出电流波形与电压同频同相，并且波形完美，对此次仿真的并网电压电流信号进行谐波检测，结果如图12所示。图12表示2~15次谐波，每次谐波是在基波基础上的谐波含量。

公用电网380 V系统标准规定电压总谐波畸变率为5.0%，各次谐波电压畸变率不超过4.0%；并网电流总谐波畸变率要低于5%，各次谐波畸变率应小于3%。本系统逆变的总电压谐波含有率为1.91%，其中3次谐波含有率1.73%，5次谐波含有率为0.50%；电流总谐波畸变率为1.33%，3次谐波含有率为1.19%，5次谐波含有率为0.86%。电压和电流的谐波畸变率都满足并网标准要求。仿真过程中发现，在接入线路的负荷对称和不对称

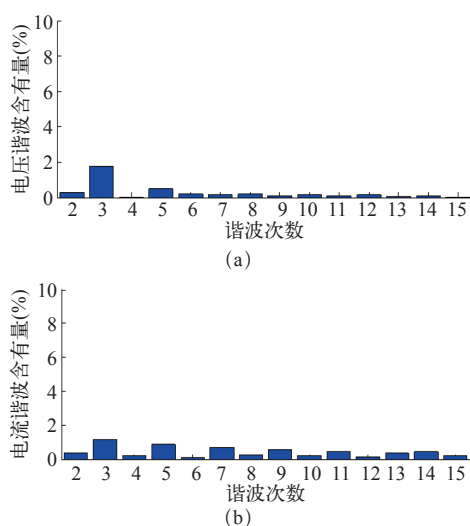


图12 电压电流谐波含量

两种情况下，改变单相光伏发电系统到系统电源的距离时，系统母线处的电压幅值不会发生变化，并且并网电信号的谐波畸变率都在正常范围内。

## 结束语

本文研究了两级式单相光伏并网发电系统。简单分析了单相光伏发电系统的控制策略，并在PSCAD中搭建了单相光伏发电系统并网的仿真模型。前级利用MPPT算法对光伏阵列进行跟踪控制，使其输出的信号均工作在最大功率点处，后级DC-AC逆变电路利用锁相环技术使输出并网电流与电网电压同频同相。仿真结果表明，在恒温恒光照强度和恒温变光照强度下，光伏阵列的输出信号均能快速跟随变化，证明了基于电导增量法的MPPT算法的跟踪控制的精确性；后级的输出电流与电网电压同频同相，并且波形完美，谐波畸变率符合并网标准。经过分析可以证明，本文所建立的单相光伏发电并网模型具有一定的准确性和有效性，可用于光伏发电系统的并网运行特性的仿真研究，为单相光伏发电并网研究提供了有利基础。EA

(收稿日期：2017.10.30)

(编辑：白文亭)